

英国非二氧化碳航空排放技术路线图与实施计划分析

Analysis of UK's Non-CO₂ Technologies Roadmap and Programme

■ 李明 / 中国航空发动机研究院

为增强对航空业非二氧化碳 (Non-CO₂) 排放的了解, 以及促进解决其对气候影响所需技术的进步, 英国在2024年3月发布了世界首个Non-CO₂航空排放的技术路线图^[1], 明确了主要研究领域与目标。

英国政府在2022年发布了《航空零排放战略》, 为实现2050年净零碳排放愿景制定了明确的框架与规划。英国航空航天技术研究院 (ATI) 在其2022年技术战略文件《零排放目标: 通向2050的技术之路》中以2050年实现航空净零碳排放为目标, 将可持续发展确定为英国航空研发的核心, 制定了中长期技术发展战略, 确定从零碳排放飞机技术、超高效飞机技术和跨领域使能技术与基础设施等3类重点技术推进可持续航空技术的发展, 虽然该战略聚焦降低二氧化碳 (CO₂) 排放, 但也明确指出需要解决航空业的Non-CO₂排放。因此, ATI本次发布的Non-CO₂技术路线图是对该技术战略的补充, 成为第4类重点技术。

Non-CO₂技术路线图是经英国工业界、学术界、航空业和国际利益攸关者广泛协商后制定的, ATI吸纳了近百名航空业和学术界领军专家的意见, 确定了燃料特性、飞机和发动机技术, 以及知识/数据/运营等3个研究领域。

非二氧化碳航空排放与影响

Non-CO₂航空排放是指飞机尾气中,

由航空发动机燃烧引起的、除CO₂以外的、对环境产生直接和间接影响的产物。Non-CO₂可能包括但不限于: 尾迹云; 氮氧化物 (NO_x) 及其与臭氧 (O₃) 和甲烷 (CH₄) 等其他气体相互作用的产物; 一氧化碳 (CO); 水蒸气 (H₂O); 硫化物, 包括硫氧化物 (SO_x) 和硫酸盐气溶胶; 颗粒物, 如碳烟 (Soot)、未燃碳氢化合物 (UHC); 氢气 (H₂); 微量的羟基化合物 (OH)。这其中大部分是在8000 ~ 13000m的巡航高度产生^[2]。

用于描述气候影响的主要指标是辐射强迫 (RF), 以W/m²为单位。航空RF约占全球人类活动RF总量的5%; 当前普遍认为, Non-CO₂对全球气候变暖造成的影响在航空排放中的占比可能高达66%, 或是CO₂净变暖率的2 ~ 3倍^[3]。但目前认知有限, 在科学上, Non-CO₂气候影响比CO₂具有更大的不确定性, 同时影响的量化上也存在很大不确定性, 且这种不确定性程度又因排放物类型和具体情形而异, 有的甚至可能是产生降温的影响, 如表1所示。

氮氧化物

NO_x一方面会通过复杂的大气化学反应形成温室气体O₃; 另一方面还由于会引发生成短暂存在的

OH, 能消除1% ~ 2%的温室气体CH₄。因此, NO_x对气候的净效应是二者的综合, 短期来看其产生的影响可能是升温。

NO_x的排放量主要取决于发动机的设计、技术、运行状态 (慢车、起飞和下降等) 和发动机运行时的大气工况 (温度、气压和湿度), 以及燃料成分。

量化NO_x影响的主要限制条件是可用的模型工具、数据及其验证。这些模型需要能表征大气的三维流场、复杂的化学反应机理、排放物的流场, 并进行时间积分。这种全球化学输运模型通常被整合到气候模型中, 且需要有超级计算能力的工具。

水蒸气

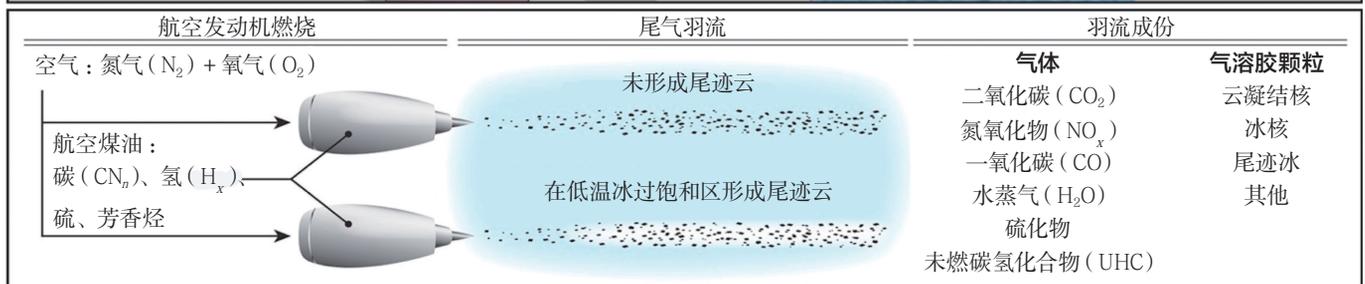
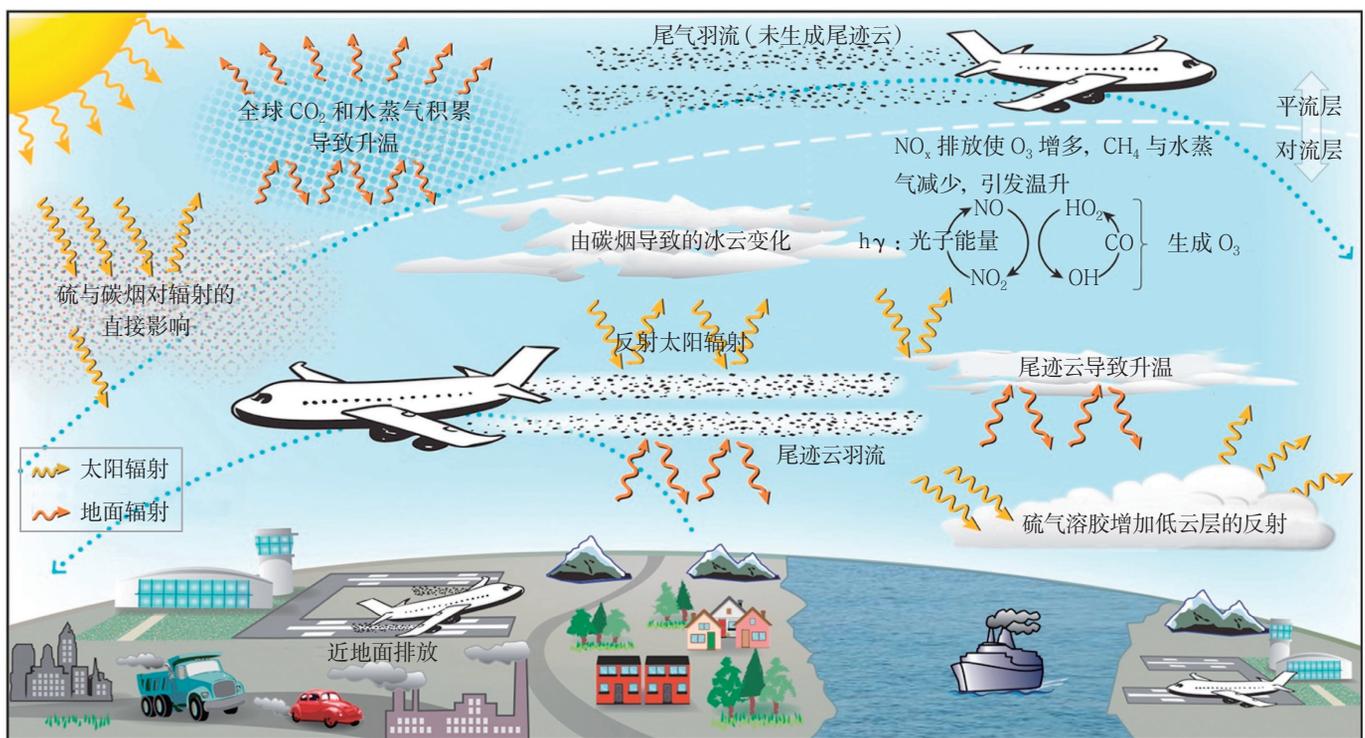
虽然是一种温室气体, 但飞机排放的水蒸气量与大气水文循环中的水相比很少, 影响也小。但未来超声速飞机将比当前亚声速飞机飞得高得多, 能将水蒸气排到干燥的平流层, 可能会对平流层形成显著扰动, 导致额外的升温。

尾迹云

当航空发动机在某些高湿度条件下 (冰过饱和区) 排放水蒸气时, 会凝结形成废气碳烟颗粒和气溶胶; 如果空气足够湿, 水蒸气会进一步

表1 航空排放物对气候的影响分析^[1]

排放物	对气候的可能影响	对气候影响的 可信度	影响持续时间
CO ₂	CO ₂ 约占人类活动温室气体排放量的80%；但一些研究表明，航空业CO ₂ 对气候变暖的影响程度低于Non-CO ₂	高	数百年
NO _x	NO _x 指几种不同的含氮和氧的气体，它们以复杂的方式与O ₃ 、CH ₄ 和水蒸气等其他气体相互作用；目前认为其对气候影响的净效应是变暖，但如果没有进一步工作，这也不能确定	低至中	数天
水蒸气	水蒸气的直接温室效应较小，但在高湿度地区，会形成持续的尾迹云	中	数天到数年（在水蒸气变成降雨前）
尾迹云	在低温高湿环境中，发动机排出的水蒸气会凝结成冰晶，形成尾迹云；虽然持续的尾迹云能同时引起降温 and 升温，但目前认为其净效果是强烈升温	低	数分钟到数小时
碳烟和颗粒物	燃烧不充分会导致生成碳烟和颗粒物，目前认为其引发的辐射吸收、散射和反射导致的直接变暖效应很小；对于碳烟和云相互作用对气候的影响，目前还没有被广泛认可的可靠评估	极低至低	数天到数月
硫	燃料中的硫会以SO ₂ 或气溶胶的形式排出，其直接影响被认为是轻微降温；对于硫和云相互作用导致的是气候变暖还是变冷，目前还没有被广泛认可的可靠评估；硫可能在尾迹云的形成中发挥了作用	极低至低	数小时到数周（具体取决于形式）
未燃碳氢化合物	现代高效航空发动机产生的未燃碳氢化合物的数量很少	中	数天到数月



航空排放与云层对辐射的影响^[3]

凝结成冰晶，形成尾迹云^[2]。尾迹云的形成与否还取决于水蒸气凝结是否持续、形成的地点和时间、大气工况、多个尾迹融合等多种因素。尾迹云的影响效果可能是升温，也可能是降温，这使得计算每次飞行对气候的净影响变得极其复杂。

碳烟

虽然黑而小的碳烟颗粒会因直接吸收红外辐射导致气候变暖，但考虑其排放量很少，因此直接影响也很有限。值得注意的是，碳烟颗粒对云的形成有很大的间接影响。量化这种效应的主要限制在于对飞机碳烟排放的可靠评估，以及对这些颗粒如何与云层和辐射相互作用的全面了解。

硫化物

燃油中的硫成分随燃烧过程氧化生成二氧化硫(SO₂)，在空气中变成硫酸，能形成颗粒或覆盖已有颗粒，这些颗粒能将太阳辐射反射回太空，因此发挥了降温作用，但航空硫排放总体较小，因此直接降温效应有限。但由于硫化物对碳烟颗粒具有涂层保护的作用，其对云的间接影响可能更大，会增强云的形成。

影响分析

航空排放对气候的影响极复杂且多变，取决于诸多因素，包括排放的高度、天气和区域具体情况，如冰过饱和区等。研究表明，航班通过避开冰过饱和区，有助于避免形成尾迹云，这种“战术性改道”提供了缓解机会，但某些情况下可能会带来燃料消耗增多、CO₂排放增加的风险。该方法可行与否，还取决于对冰过饱和区的预测准确度。此外，各排放物间还存在复杂的相互作用和相互依赖，且不同排放影响气候的持续时间存在很大差别。

研究Non-CO₂技术路线图中确定的优先技术领域，能降低基础科学中的不确定性，并提供技术解决方案，以改善或避免飞行中的Non-CO₂排放。

非二氧化碳航空排放技术路线图

目标

与2000年前的航空发动机相比，NO_x排放减少90%；就SO_x、水蒸气和尾迹云排放达成共识，并设定其中长期目标；非挥发性颗粒(nVPM)排放的质量和数量降低90%，并就减少其他颗粒物排放达成共识。

里程碑

第一阶段(2024—2030年)：实现气态氢支线零碳客机服役；持续加大可持续航空燃料(SAF)使用，到2030年年底达到10%。第二阶段(2030—2040年)：实现超高效窄体客机和液态氢支线零碳客机分别服役。第三阶段(2040—2050年)：实现超高效宽体客机和窄体零碳客机分别服役。

研究领域

一是燃料特性，包括化石燃料、SAF、氢和其他替代燃料。主要开展SAF和其他替代物的引进和使用推广相关的研究，包括氢燃料电池和氢燃料涡轮发动机。例如，对即用型(drop-in) SAF的真实颗粒特性和缺乏芳香烃的非即用型SAF的可能优缺点仍未确定；还包括对煤油使用规范进行调整，以提高其Non-CO₂认证，以及对混合燃料组合或SAF的优化使用。

二是飞机和发动机技术。包括研究用于排放测量和管理的仪器和传感解决方案；与使用氢相关的系

统和控制技术，包括水蒸气排放；发动机控制或燃烧技术发展；管理混合动力或双燃料系统的技术。

三是知识、数据与运营。包括开展与模拟、试验和数据关联活动等有关的研究；对颗粒物和尾迹云形成的大气认知；NO_x在高空的作用；氢的利用导致产生水蒸气；用于飞行运营改善和全生命周期模型的数据管理系统。

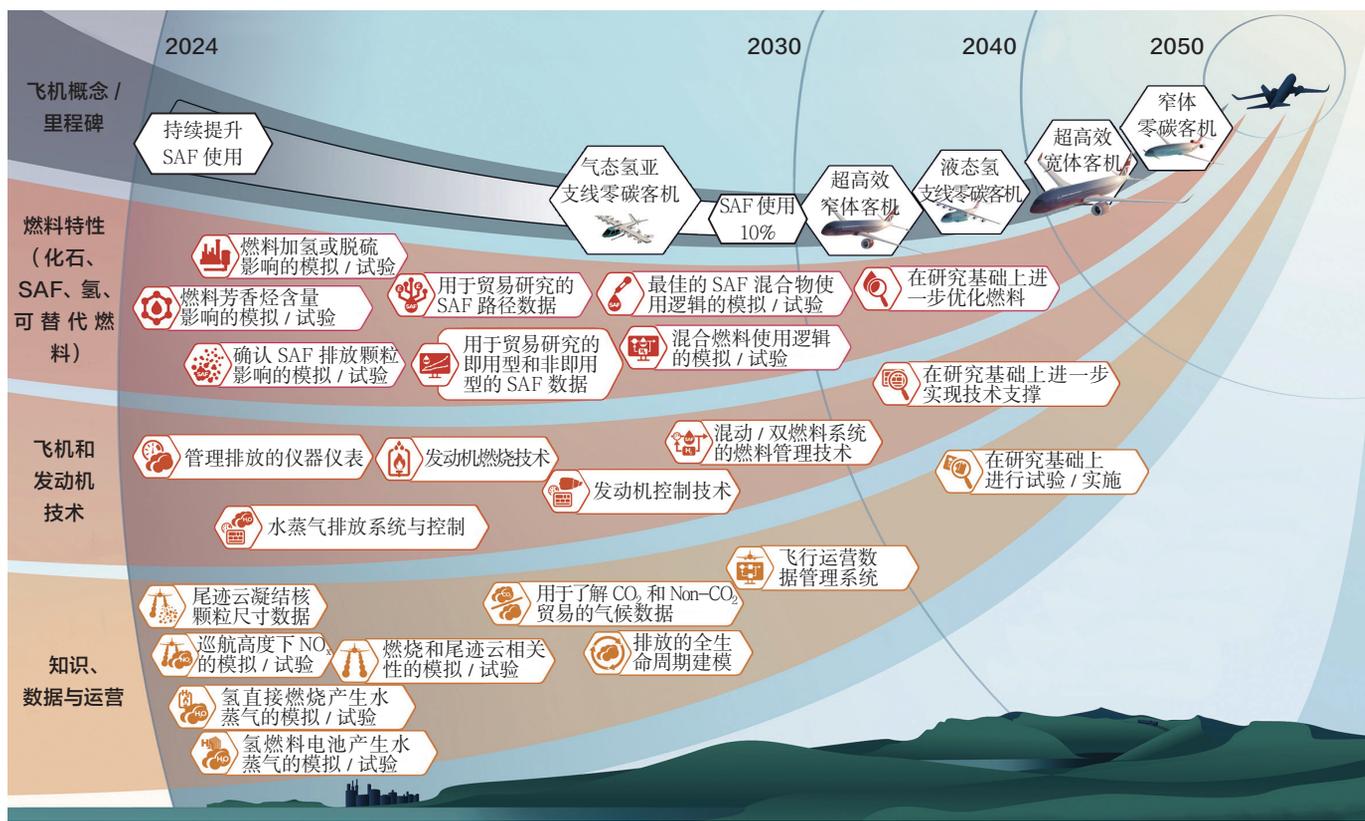
这3个领域被认为是降低气候影响的关键，解决这些问题还需要考虑改善措施的相互依赖性和可能的意外后果。例如，某些燃烧室技术可能会降低NO_x，但会增加碳烟颗粒；更高效的发动机能减少CO₂排放，但可能更容易产生尾迹云。对Non-CO₂排放的了解和改善措施的复杂性将推动对其他领域的专业知识和活动的需求，如太空卫星、天气预测、空中交通管制或燃料化学等得到相关资金支持。

研究计划

该Non-CO₂航空排放技术路线图提前显示了ATI计划在2024年5月启动的一个新的Non-CO₂研究计划优先资助的重点。该研究计划旨在将理论概念转化为可行技术，侧重于工业研究、技术开发或使能技术项目，由ATI、英国商贸部(DBT)和创新局(IUK)等机构协调和管理，期望发挥英国学术界、政府机构和行业的合力；从2024年开始，由ATI提供1700万英镑资金，在未来4年开展研究，是英国政府整体的航空Non-CO₂计划的一部分。

英国的非二氧化碳航空排放计划

为解决航空业的Non-CO₂影响，英



非二氧化碳航空排放技术路线图^[1]

国自然环境研究委员会 (NERC)、交通部 (DfT)、DBT、ATI 与 IUK 联合开展了 Non-CO₂ 航空排放计划，并在 2023 年 10 月首次启动征集研究项目^[4]。该计划重点关注 Non-CO₂ 航空排放影响，并试图确定 Non-CO₂ 的气候影响随时间如何变化，以及如何减轻，以期为行业融资以及政府政策和投资决策等提供参考。

该计划主要涉及由学术界主导的基础研究和由行业主导的应用研究等 2 类主题、共 6 项技术，技术成熟度 (TRL) 为 1 ~ 4。计划将提高对 Non-CO₂ 排放背后基础科学的认知，有助于更可持续的航空技术的发展，也能推动使用更好的燃料和新的运营措施^[4]。

加深对航空 Non-CO₂ 影响的认知

一是减少关于尾迹云形成、持

续性和气候影响的不确定性。尾迹云被认为是目前航空业 Non-CO₂ 影响的最大因素，但持续的尾迹难以预测，其影响结果的可信度较低。重点探索内容包括：改进冰过饱和区的当前模型和预测能力，并完善天气模型，以增强对何处更有可能形成尾迹云的认知；通过加强对尾迹云及其寿命和辐射强迫的观测来验证这些模型。

二是更好地了解 NO_x 排放的形成及气候影响。当前 NO_x 排放的研究主要是地面环境，影响的可信度较低，部分原因是巡航高度的大气与 NO_x 颗粒相互作用的复杂性。重点探索内容包括：增加对 NO_x 排放（特别是巡航高度）的观测与模拟，以降低不确定性；加深对未来 NO_x 排放净效应的认知，甚至是否有可能是

从致暖转变为致冷。

三是提高对其他 Non-CO₂ 排放和影响的认知，对 Non-CO₂ 排放需要更深入的科学理解。重点探索内容包括：增加对水蒸气、气溶胶-辐射相互作用（来自碳烟和硫排放等颗粒物）以及气溶胶-云相互作用的模拟和观测；了解尾迹云形成和 NO_x 间的相互作用。

减轻航空 Non-CO₂ 影响

一是使用 SAF。目前研究表明，SAF 有望对减轻 Non-CO₂ 影响产生积极作用，因为 SAF 的碳烟颗粒排放少，进而可能缩短尾迹云，降低对气候变暖影响。然而由于证据和模型有限，SAF 降低尾迹云对气候影响的程度还不明确。但由于纯 SAF 不含硫，因此能消除硫化物对尾迹云形成的影响。重点探索内容包括：利

用观测数据，改进关于掺混SAF飞行对尾迹云形成和持续性影响的建模和认知；探索SAF掺混比例与Non-CO₂影响之间的关系；考虑哪些特定的SAF路径（如原料和技术）比其他的更能降低Non-CO₂影响。

二是使用氢燃料发动机和氢燃料电池。氢动力飞机能消除所有碳排放，但相比航空煤油或SAF，可能会排放更多水蒸气，其影响存在不确定性，有证据表明氢动力飞机仍会产生尾迹云，但与当前的形式不同，可能是由更少但更大的冰晶组成，其光密度、持续时间、辐射强度仍有待进一步研究。还有证据表明，氢燃料发动机会导致生成更多的热机理型NO_x。另外，氢气本身就是一种温室气体，要重视其逸散和管理。重点探索内容包括：评估氢燃料电池飞机增加高层大气、平流层和对流层水蒸气的可能性，及对尾迹云形成的影响；评估氢燃料发动机增加NO_x生成的可能性，以及相比目前燃油飞机的增加量；考虑是否有方法能缓解NO_x的潜在增加，如降低燃烧温度或通过化学过程去除NO_x等。

三是尾迹云预测和避免技术等其他方法。有几种潜在的运营和政策途径可用于减轻航空Non-CO₂影响，如煤油芳香烃含量影响尾迹云形成，碳定价也被证明是减少航空Non-CO₂排放的有效工具，毕竟航空煤油在可预见的未来仍将是重要的航空燃料。但更为重要的是尾迹云预测和避免技术，商业运营商对此的关注也越来越高。然而，目前尚无验证过的方法能够足够准确地预测尾迹云的可能形成区域，及对气候的影响；也没有验证过的方法能够确保燃料消耗和CO₂排

放不会增加。重点探索内容包括：通过提高对天气、冰过饱和区和尾迹云等模拟能力，增强对尾迹云准确避免技术和策略的认知；通过初期基于地面的观测来验证这些模型，甚至未来通过卫星和飞机观测；要考虑如果大量航班选择“战术性改道”，避免形成尾迹，是否会对空域容量和安全造成问题，以及是否会降低系统效率；考虑Non-CO₂和CO₂之间的权衡，航空业对气候的整体影响是否会降低；进一步了解诸如煤油芳香烃含量调整或碳定价等其他降低Non-CO₂方法的有效性。

结束语

除英国计划开展Non-CO₂航空排放的研究外，美国已开始了相关研究，如航空发动机制造商（普惠公司）、政府机构、高校和企业正在就先进低污染燃烧室的试验设计、实施和数据分析方面开展合作。国际航空运输协会(IATA)也正在与气象学家、飞机和发动机制造商、技术研发机构、航空公司、政府及航空运输领域的其他利益攸关者合作制订如何监测和报告Non-CO₂排放的计划。

虽然航空业碳排放量在全球总量的占比并不高，对气候影响的比重也相对低，但作为高科技的标志性行业，航空业仍将减碳确定为目前和未来发展重点，世界航空大国和主要企业也都制定了相关政策和实施路线。随着技术的发展，人们对Non-CO₂气候影响的认知有所加深，统计上有了定性的结论，虽然很多排放物的影响程度、作用时间、相互作用等细节仍不能量化，但人们已认识到其重要性，并开始较为系统地研究。

也许在Non-CO₂排放的认知相对明确、部分排放物影响被发现十分重要后，会出现类似碳排放的国家政策与国际较量，因此提前进行探索和布局，有一定意义。同时作为一个影响全球的公共事务，航空业提早开发先进技术造福人类，也是责无旁贷。

航空动力

（李明，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略和科技情报研究）

参考文献

- [1] Aerospace Technology Institute.UK' s first Non-CO₂ technologies roadmap published as funding programme to tackle aviation' s broader atmospheric emissions announced [EB/OL]. (2024-04-11) [2024-04-18]. <https://www.ati.org.uk/news/uks-first-non-co2-technologies-roadmap-published-as-funding-programme-to-tackle-aviations-broader-atmospheric-emissions-announced/>.
- [2] IATA. Non-CO₂ aviation emissions[EB/OL]. (2024-04-11)[2024-04-18].<https://www.iata.org/contentassets/5499da2b3b7d46b3b13be4dad54a9689/policy-position-non-co2-aviation-emissions.pdf>.
- [3] LEE D S, FAHEY D W, SKOWRON A, et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018[J]. Atmospheric Environment, 2021, 244: 117834.
- [4] UK Research and Innovation. Jet zero: aviation' s Non-CO₂ impacts on the climate [EB/OL]. (2024-04-11) [2024-04-18]. <https://www.ukri.org/opportunity/jet-zero-aviations-non-co2-impacts-on-the-climate/>.